

Quantification de la déformation associée à la faille active d'Aigion (golfe de Corinthe, Grèce) par l'étude des dépôts du Pléistocène supérieur et de la transgression marine holocène

Francis Lemeille^{a,*}, Denis Sorel^b, Chantal Bourdillon^c, Claude Guernet^d, Maria Manakou^e, Catherine Berge-Thierry^a

^a Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, BP 17, 92262 Fontenay-aux-Roses, France

^b UMR 8616, université Paris-Sud, 91405 Orsay, France

^c Émergence, Incubateur du Maine, 72000 Le Mans, France

^d Laboratoire de micropaléontologie, université Pierre-et-Marie-Curie, Paris-6, 75252 Paris cedex 05, France

^e Laboratoire de mécanique des sols, université de Thessalonique, 54006 Thessalonique, Grèce

Reçu le 4 mars 2002 ; accepté le 8 avril 2002

Présenté par Jacques Angelier

Abstract – Quantification of the deformation associated with the active Aigion fault (Gulf of Corinth, Greece) using the study of Upper Pleistocene and Holocene marine transgression deposits. A 205 m-deep borehole drilled in the Aigion harbour crosses three main sedimentary units: a lower deltaic unit, interbedded with lagoon brackish layers attributed to sea level high stands of marine isotopic stages 5 and 3, an intermediate brackish unit and an upper marine Holocene unit. Environmental conditions of sedimentation are determined by palaeontological studies. ¹⁴C ages and correlations with published sea level curves yield preliminary results on subsidence and sedimentation rates. Subsidence rates are close to those inferred from palaeoseismological studies (1.5–3.0 mm yr⁻¹), whereas sedimentation rates are variable (1.5–13.8 mm yr⁻¹). These rates will allow estimating the activity of nearby faults. *To cite this article: F. Lemeille et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 497–504.* © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Greece / Gulf of Corinth / Upper Pleistocene / Holocene / subsidence / active faulting / sedimentation rate

Résumé – Un forage de 205 m situé à Aigion a traversé trois ensembles : un ensemble inférieur deltaïque, avec des passées saumâtres attribuables aux pulsations marines des stades isotopiques 5 et 3, un ensemble intermédiaire saumâtre et les dépôts de la transgression holocène. Des datations ¹⁴C accompagnent une étude paléontologique des sédiments, précisant les conditions de dépôt. Ces résultats permettent la comparaison avec les courbes de variation du niveau marin connues sur cette période. L'évolution des taux de subsidence (1,5–3,0 mm an⁻¹), proches de ceux obtenus par la paléosismologie, et des taux de sédimentation (1,5–13,8 mm an⁻¹) permettront d'estimer l'activité des failles voisines. *Pour citer cet article : F. Lemeille et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 497–504.* © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Grèce / golfe de Corinthe / Pléistocène supérieur / Holocène / subsidence / faille active / taux de sédimentation

Abridged version

1. General setting

The east–west-trending Gulf of Corinth is located in the most seismically active rift in Europe, and the north

dipping Aigion fault is one of its active faults. Most of the town of Aigion is built on the uplifted footwall of the fault, and suffered serious damage during the 1995 $M = 6.2$ earthquake. The study of site effects on seismic waves is one of the goals of the CORSEIS European Program. An array of six boreholes was drilled in recent sediments

* Correspondance et tirés à part.

Adresse e-mail : francis.lemeille@irsn.fr (F. Lemeille).

in the area of the Aigion harbour, in the hanging wall of the Aigion fault. These boreholes are equipped with accelerometers and pore pressure probes at various depths. The deepest borehole $\Gamma 1$ is located 250 m north of the cliff formed by the fault scarp. A north–south seismic profile in the hanging wall shows a southward tilting, and secondary faults with significant offsets. An outcrop of silty marl located west of Aigion in the footwall and a nearby 61 m deep Giftissa borehole, drilled by IPG Paris/ENS, and located in the hanging wall are taken into account in this study (Fig. 1).

2. Methodology

The aim of the study is to investigate the activity of the Aigion fault using vertical deformation rates. Three major sedimentary units were characterised. ^{14}C ages obtained on fossils allow to calculate sedimentation rates, and to estimate the age of sedimentary markers and the limits between the major units. Dating was performed on samples of $\Gamma 1$ and Giftissa series (Table 1). Ages are given with non-calibrated values to take into account all the uncertainties, and to be coherent with bibliographic values. The age of a level allows to refer to sea level and palaeotemperature curves and to know the sea level elevation during its deposition (Fig. 1). The knowledge of environmental features (salinity, location of the shoreline, seawater depth...) is improved by studies of the MICROHOLOCOR (acronym for MICRO-organisms, HOLOCene and CORinth) team on malacofauna, microfossils (Ostracods, benthic and pelagic Foraminifers, Nannoplanton, Diatoms, Palynology) and $\delta^{18}\text{O}$ analysis.

3. Description of the units drilled

3.1. Fluvio-deltaic Unit (205–112 m)

It is mainly composed of deltaic pebbles and sands, interbedded with layers of silty clay around 198 m, 153 m, 144–140 m and 137–128 m. Some fossils found in silty clays (*Hydrobia* sp., fragments of Bivalves, Foraminifers) reveal oligo- to mesohaline water. The sedimentation rate of this unit cannot be calculated. Using assumed values of 1.8 and 2.5 mm yr^{-1} , the marine intercalations could correlate with high stand sea level of marine isotopic stage (MIS) 5a and 3c. In the eastern Gulf of Corinth, marine terraces have been correlated with the 5c to 3c high stand sea levels [7].

3.2. Brackish Unit (112–68 m)

This unit consists of homogeneous green silty clays, with an abundant fresh water fauna of (*Hydrobia*, *Unio*, *Neritina*...). Between 103 and 92 m, microorganisms indicate a slightly brackish oligo- to mesohaline environment, with interbedded marine littoral pulsations, and a clear marine layer with corals around 95 m depth. A sample at 103 m depth indicates an age of 35.3 ka BP. The calculated mean sedimentation rate is 1.6 mm yr^{-1} , and therefore the basis of this Unit would be around 41 ka BP and the marine

layer at 95 m around 30 ka, corresponding to the younger high stand of the MIS 3a.

3.3. Marine Unit (68–0 m)

3.3.1. Lower part (Holocene marine transgression) (68–30 m)

This unit begins with a conglomerate reworking underlying silts. Black clays alternating with coarse to pebbly sands compose this lower part. Marine fauna is abundant at the bottom. Two samples yielded ages of 11.5 ka BP (66 m) and 6.2 ka BP (32 m), i.e. the time span of the Holocene transgression. The mean sedimentation rate is faster compared to the brackish unit: 6.4 mm yr^{-1} . The extrapolated age for the onset of the transgression is about 11.8 ka, and terminates at 5.9 ka, with a sudden change in lithology and in the amount and nature of its marine fauna.

3.3.2. Upper part (30–0 m)

This unit is composed of conglomerates and sands containing carbonated concretions, and pink to white colours, which may reveal shallow water or possible emersions. An age of 4.1 ka BP is obtained at 5 m depth. The sedimentation rate reaches 13.8 mm yr^{-1} between 30 to 5 m. This high value can be explained by the important water depth resulting from the Holocene transgression.

4. Subsidence rates

The sedimentary evolution in the series is shown in Fig. 2. The average subsidence rate is about 1.8 mm yr^{-1} , close to the mean sedimentation rate (2.5 mm yr^{-1}). Between 205 and 68 m depth, the subsidence and sedimentation rates are similar (Table 2). A major environmental change occurred around 41 ka BP with the onset of brackish water. As sea level was lower than during the previous marine incursions (high stand 5a and 3c), this change could result from a tectonic deepening of the strait of the Gulf. Seawater definitely invaded the Gulf by 11.8 ka BP. The depth of the Rion sill was probably equivalent to the sea level at that time (–60 m). During the Holocene transgression, the sedimentation rate (6.4 mm yr^{-1}) was lower than the sea level rise ($\approx 10 \text{ mm yr}^{-1}$). This may account for a high sedimentation rate (13.8 mm yr^{-1}) that could maintain and fill about 17 m of water after the transgression, with marine and deltaic sediments (found between 30 and 13 m depth).

5. Preliminary implications for the activity of the Aigion fault

Correlations between marine and brackish deposits of Upper Pleistocene and Holocene age in Aigion boreholes and eustatic sea level fluctuations controlling the communication of the Gulf of Corinth with the Mediterranean Sea provide insights on the activity of the Aigion fault and on the geometry of nearby deposits.

The seismic profile shows a gentle southward dip of the hanging wall sediments. This dip may reveal tilting caused by the fault movement. A slope of 2–3% is confirmed by

the variation of depth of markers dated in the boreholes Giftissa and $\Gamma 1$ (Fig. 1), for which sedimentation rates are similar. Tilting is often observed in the hanging wall of normal faults of the Gulf of Corinth. This causes fan-shaped accumulation in which dip can reach 20–30° at the basis of the fans.

In the uplifted footwall of the Aigion fault, brackish white silty marls with marine intercalations have been sampled around 40 m. U/Th dating on shell fragments did not provide reliable ages, but ^{14}C dating gives a minimum age of 34 ka BP that may correspond to the 3a high stand. Considering the past sea level [3] and seawater depth less than 5 m (data from micro-organisms), the footwall uplift of Aigion fault is around 86 m, meaning an uplift rate of 2.5 mm yr^{-1} for the last 34 ka (Fig. 1). The equivalent

deposits in the borehole are –103 m deep, implying a subsidence rate of 1.7 mm yr^{-1} .

The vertical movement on Aigion fault during the last 34 ka would be around 4 mm yr^{-1} for a total offset of 146 m. If the dip of the fault is of 55–60° as for the Heliki fault, the slip rate on the fault is close to 5 mm yr^{-1} .

It is the first time that, in the Gulf of Corinth, a stratigraphic marker level with dating constraints, identified on the two sides of a main active fault, is providing a vertical deformation rate. GPS measurements indicate a north–south extension rate of some 15 mm yr^{-1} (e.g., [2]). From our study, the amount of extension transferred on the Aigion fault is around 5 mm yr^{-1} . Therefore, it is likely that other active faults exist offshore along this cross section of the rift.

1. Cadre général

Le golfe de Corinthe est long de 130 km sur 5 à 15 km de large (Fig. 1). Il atteint près de 900 m de profondeur, et le seuil de Rion (–65 m) le relie au golfe de Patras à l'ouest. Il occupe un rift dissymétrique, qui résulte du jeu d'une importante faille de détachement quaternaire à faible pendage nord (30–35° N), située sur sa bordure sud [17]. Le détachement est toujours actif sous le golfe, qui est une des régions les plus sismiques d'Europe (par exemple, [15, 16]). Sur ce détachement se sont successivement enracinées, du sud vers le nord, des failles normales à plus fort pendage vers le nord, délimitant des bassins basculés vers le sud dans lesquels s'accumulaient les dépôts syn-rift [6]. La faille d'Aigion est une de ces failles normales encore actives. Le jeu du détachement, de l'ordre d'une quinzaine de kilomètres d'extension nord–sud en 1 à 1,5 Ma, a produit une importante surrection de son mur, la bordure nord du Péloponnèse, et a progressivement fait émerger ces bassins pléistocènes, dont les plus anciens sont portés jusqu'à 1800 m d'altitude.

L'activité des failles normales du bord sud du golfe est attestée par des ruptures de surface cosismiques, et des tsunamis sur les côtes affaissées lors des séismes de 373 av. J.-C. [18] et du 26 décembre 1861 ($M_S \geq 6,6$) sur la faille d'Heliki [9], et du 16 juin 1995 ($M_S = 6,2$) sur la faille d'Aigion [8, 12].

Ce travail entre dans le cadre du programme européen Corseis, dont un objectif est l'étude des effets de site sur les ondes sismiques, au moyen d'accéléromètres et de capteurs de pression de pores installés dans des forages situés dans les formations meubles du port d'Aigion. Un profil sismique haute résolution de 720 m de long, réalisé avant le forage, avait pour but de proposer une coupe géologique et structurale prévisionnelle. Un forage voisin de 61 m, réalisé par

IPG Paris/ENS à Giftissa, est aussi utilisé dans cette étude.

2. Méthodologie

Le forage $\Gamma 1$ est situé à 250 m de la faille normale active d'Aigion dans son toit subsident. Des études à terre ont montré que, depuis le Pléistocène moyen, les fluctuations glacio-eustatiques du niveau marin mondial ont interféré avec le seuil de Rion, faisant alterner eau douce et marine dans le golfe et modifiant les caractères de la sédimentation littorale. Le lever géologique de la séquence forée a permis d'y reconnaître des ensembles sédimentaires et leurs limites. La datation (^{14}C) de niveaux sédimentaires permet de calculer le taux de sédimentation entre deux niveaux et d'estimer par extrapolation l'âge des limites des ensembles sédimentaires. Ces âges permettent aussi de se référer aux courbes de variation du niveau de la mer pour connaître le niveau marin au moment du dépôt. La profondeur du dépôt peut être déduite de ses caractères sédimentologiques et des conditions paléocéologiques indiquées par son contenu micropaléontologique. Entre deux repères successifs, le taux de subsidence peut être calculé.

Un objectif de l'étude du forage est d'estimer la subsidence tectonique près de la faille d'Aigion. On suppose que, sur la brève période considérée (environ 100 ka), la répartition de l'activité tectonique entre la faille d'Aigion et d'éventuelles autres failles actives ne change pas sensiblement. Les paramètres essentiels qui influencent la paléogéographie locale et les apports sédimentaires sont l'eustatisme, la tectonique et les changements climatiques. Le compartiment au toit de la faille d'Aigion, relativement plat, est a priori sensible à de faibles variations environnementales. Le littoral devait toujours être proche de la faille et la tranche d'eau assez faible.

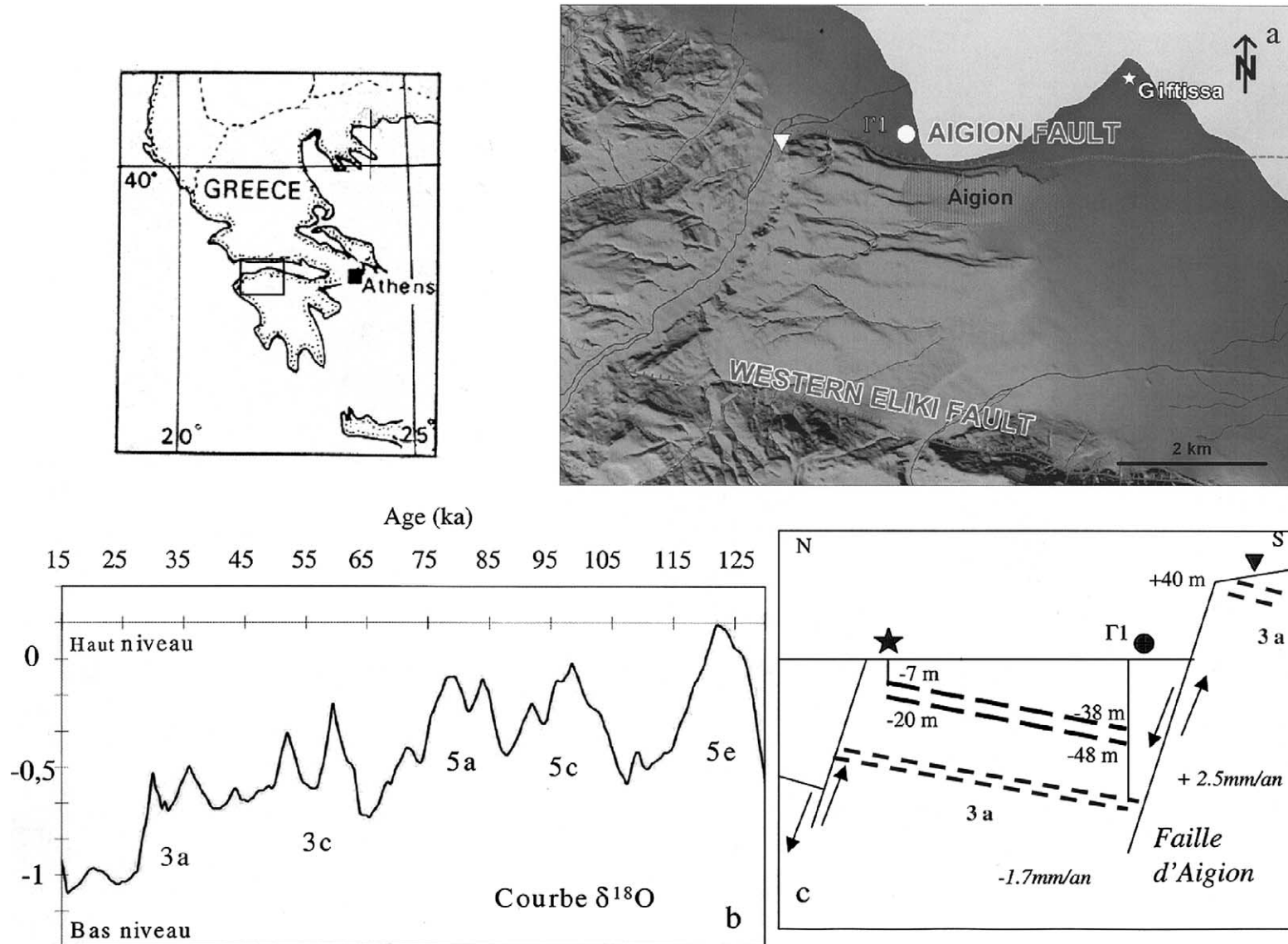


Figure 1. a. Carte schématique de la partie occidentale du golfe de Corinthe : localisation des failles principales, des forages $\Gamma 1$ et Gyftissa et de l'affleurement au sud-ouest d'Aigion (triangle). **b.** Courbe $\delta^{18}\text{O}$, affranchie des variations importantes de salinité et de température [10], en fonction du temps (ka) ; hauts niveaux marins : stades isotopiques 5a, 3c et 3a. **c.** Coupe schématique et taux de déformation verticale de part et d'autre de la faille d'Aigion.

Figure 1. a. Schematic map of the western Gulf of Corinth: location of the main faults, of the boreholes $\Gamma 1$ and Gyftissa and of the outcrop southwest of Aigion (triangle). **b.** $\delta^{18}\text{O}$ curve smoothed for main salinity and temperature changes [10] vs time (ka); sea level high stands: isotopic stages 5a, 3c and 3a. **c.** Schematic cross-section and vertical deformation rates on the Aigion fault.

Tableau 1. Caractéristiques des datations (réalisées par C. Flehoc, BRGM, Orléans). Âge conventionnel : âge déterminé à partir de la mesure de l'activité du ^{14}C , normalisée par rapport à celle du carbone moderne, référencée et corrigée des effets isotopiques. La période du ^{14}C est égale à 5568 ans et l'année de référence est 1950 AD. L'estimation statistique de l'âge en années calendaires est faite à partir de courbes de calibrage de la littérature [19]. Les fourchettes d'âge représentées correspondent à 95% de probabilité (entre parenthèses, poids relatif de chaque fourchette pour la statistique donnée).

Table 1. Characteristics of the datings (performed by C. Flehoc, BRGM, Orléans, France). Conventional age: age determined from the measurement of ^{14}C normalised activity compared to those of modern carbon referenced and corrected of isotopic effects. The ^{14}C period is equal to 5568 yr and the reference year is AD 1950. The statistical estimation of the age in calendar years is carried out with the aid of a calibration curve of the literature [19]. The extreme values correspond to a 95% probability (between brackets, relative weight of each interval of values for a given statistic).

Forage	Cote	Activité (% carbone moderne)	$\delta^{13}\text{C}\%$ vs PDB	Âge ^{14}C conventionnel (ans BP [$\pm 1\sigma$])	Âge estimé en années calendaires $\pm 2\sigma$ (95% de probabilité)
$\Gamma 1$	-5,5 m	$60 \pm 0,3$	$1,9 \pm 0,1$	4100 ± 40	2300–2060 cal BC (1,00)
$\Gamma 1$	-32,3 m	$45,7 \pm 0,2$	$0,1 \pm 0,1$	6290 ± 40	4890–4700 cal BC (1,00)
$\Gamma 1$	-66 m	$23,7 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,1$	$11\,550 \pm 40$	11 800–11 760 cal BC (0,02) 11 510–11 470 cal BC (0,03) 11 230–10 910 cal BC (0,94) 10 770–10 730 cal BC (0,02)
$\Gamma 1$	-103 m	$1,2 \pm 0,1$	$-1,6 \pm 0,1$	$35\,340 \pm 410$	
Giftissa	-7 m	$39,9 \pm 0,2$	$0,4 \pm 0,1$	7380 ± 40	5970–5800 cal BC (1,00)
Giftissa	-14 m	$36,9 \pm 0,2$	$0,8 \pm 0,1$	8010 ± 40	6600–6430 cal BC (1,00)
Giftissa	-20 m	$33,9 \pm 0,2$	$-1,9 \pm 0,1$	8690 ± 40	7650–7600 cal BC (0,03) 7490–7020 cal BC (0,97)
Sud-Ouest Aigion	+40 m	$1,4 \pm 0,1$	$+0,6 \pm 0,1$	$34\,490 \pm 130$	

Les paramètres environnementaux (bathymétrie, salinité...) sont déterminés par les études d'un groupe de recherches informel et international (groupe Microholocor : acronyme pour *micro*-organismes, *holo*-cène, *corinthe*).

3. Description lithologique du forage $\Gamma 1$

La tête du forage est située 1 m au-dessus du niveau de la mer, et sur 0,5 m de remblai anthropique.

3.1. Formation fluvio-deltaïque (205–112 m)

Cet ensemble, souvent azoïque, sablo-conglomératique à argilo-silteux d'origine fluvio-deltaïque et de couleur ocre présente plusieurs passées argileuses marron-gris à verdâtres. Certaines passées (vers 198 m et 153 m, 144–140 m et 137–128 m) contiennent des *Hydrobia*, des fragments de bivalves marins ou saumâtres, des foraminifères et des ostracodes, ce qui indique un milieu lagunaire faiblement halin, le plus souvent oligohalin (salinité totale comprise entre 1 et 5‰).

3.2. Formation saumâtre (112–68 m)

Elle est constituée de silts argileux gris-verdâtre homogènes, renfermant une abondante faune de mollusques d'eau douce (*Hydrobia*, *Unio*, *Neritina*...). Les micro-organismes indiquent un milieu lagunaire saumâtre oligo- à mésohalin, avec des passées litto-

rales entre 103 et 92 m. Autour de 95 m, une passée marine a livré des ostracodes et foraminifères marins ainsi que des coraux.

3.3. Formation marine (68–0 m)

Sa partie inférieure (68–30 m) débute par un conglomérat cimenté, remaniant les silts sous-jacents. La malacofaune est marine (*Turritella* abondantes). Ensuite, des argiles plastiques gris-noir, parfois silteuses, alternent avec des couches sablo-conglomératiques à ciment argileux. Plusieurs passées détritiques plus grossières, marron à rose, pourraient représenter des avancées de sédiments deltaïques. Cet ensemble fin s'achève par 5 m de galets. La partie supérieure (30–0 m) est constituée de sédiments détritiques, plus ou moins grossiers, et d'intercalations argilo-silteuses. Les coquilles marines peuvent être abondantes. Les passées conglomératiques renferment souvent des concrétions carbonatées blanches, suggérant des émergences temporaires.

4. Datations

Neuf datations ^{14}C (AMS) ont été réalisées sur des fragments de coquilles et des débris végétaux du forage $\Gamma 1$ (Tableau 1). Dans le forage voisin de Giftissa, réalisé par l'IPG Paris/ENS, trois fragments de coquilles ont aussi fourni des âges (Tableau 1). Les éléments végétaux ont donné des âges supérieurs à

Tableau 2. Vitesses de sédimentation et taux de subsidence pour les repères rattachés à un environnement marin. (*) Taux de sédimentation supposé. Les vitesses de subsidence sont calculées au moyen de la formule suivante (les variables sont définies dans le Tableau 1) : $d_2 - d_1 = \{(Zsl_2 - h_2) + (P_2 - P_1) - -(Zsl_1 - h_1)\} / (d_2 - d_1)$.

Table 2. Sedimentation and subsidence rates for markers related to marine environment. (*) Assumed sedimentation rate. Subsidence rates are calculated with the above-mentioned formula (variables are defined in Table 1).

Repère	Profondeur forage P (m)	Âge datation d (ka)	Âge extrapolé d (ka)	Niveau de la mer Zsl (m)	Hauteur d'eau h (m)	Altitude dépôt (m)	Taux de subsidence (mm an^{-1})	Taux de sédimentation (mm an^{-1})
Sol	0			0				1,2
Datation	5	4,1		-1	1	-2	-1,6	13,8
Fin de la transgression holocène	30		5,9	-8	16	-24	~ 0	6,6
Datation	32	6,2		-8	18	-26	-1,5	6,4
Datation	66	11,5		-49	3	-52	~ 0	6,6
Début de la transgression holocène	68		11,8	-55	0	-55	-1,7	1,5
Haut niveau marin 3a	95		30	-46	5	-51	-1,7	1,7
Datation	103	35,3		-45	5	-50	-2,7	1,8*
Base de la formation saumâtre	112		41		0			
Haut niveau marin 3c	135		52	-30	5	-35	-2,8	2,5*
Haut niveau marin 3c	153		59	-28	5	-33	-3,0	2,5*

40 ka, hors de la méthode ^{14}C , et seraient remaniés. Compte tenu des incertitudes sur plusieurs paramètres pris en compte dans la méthodologie, et par cohérence avec les données bibliographiques, les âges ne sont pas calibrés.

5. Interprétation géologique

5.1. Taux de sédimentation

Faute de datation dans l'ensemble inférieur, des taux de sédimentation hypothétiques de 1,8 et de 2,5 mm an^{-1} [13] (Tableau 2) permettent de corréliser les passées saumâtres avec les hauts niveaux marins 5a et 3c, dont les âges estimés sont de 78, 59 et 52 ka BP (par exemple, [10]). Ces taux sont proches de celui de l'ensemble sus-jacent. Des terrasses marines transgressives, corrélées aux stades 3c à 5c, sont connues dans la partie orientale du golfe de Corinthe [7].

Dans la **formation saumâtre**, le taux de sédimentation calculé de 1,6 mm an^{-1} permet d'extrapoler un âge d'environ 41 ka BP pour la base de cette formation. L'homogénéité de cette formation permet de penser qu'il n'y a pas de lacune notable avant le début de la transgression marine holocène. La brève passée marine vers 95 m, à laquelle est attribué un âge voisin de 30 ka BP, peut être associée au stade isotopique 3a. Vers 77 m, une passée pluridécimétrique de gravelles vient interrompre l'uniformité de la sédimentation. Ce niveau aurait un âge de 18–17 ka, coïncidant avec une accélération dans la déglaciation, entraînant un changement environnemental et une reprise d'érosion, la vitesse de remontée du niveau de la mer passant de 6 à 10 mm an^{-1} [4].

La **formation marine intermédiaire** a fourni les âges suivants : 11,5 ka BP à 66 m et 6,2 ka BP à 32 m. Le taux de sédimentation (6,4 mm an^{-1}) donne des âges indicatifs de 12 ka pour la base et 6 ka BP pour le sommet de la formation, qui correspondent à la période de la transgression holocène. Le taux de sédimentation élevé refléterait la dynamique transgressive de l'ordre de 10 mm an^{-1} entre 17 et 7 ka [5], associé à des apports sédimentaires soutenus.

Une datation réalisée à 5 m dans la **formation marine supérieure** indique un âge de 4,1 ka BP. Le taux de sédimentation moyen serait donc de 1,2 mm an^{-1} seulement depuis 4,1 ka BP, sous réserve de continuité sédimentaire, et de 13,8 mm an^{-1} pour la tranche de 5 à 30 m. Ce taux élevé, et les indicateurs de faible épaisseur d'eau dans le haut de la série (concrétions carbonatées, galets à perforations de *Clione* à 8 m, faibles variations du niveau de la mer de -4 à -1 m à la fin de la transgression), indiquent que la sédimentation a comblé la tranche d'eau créée par la transgression holocène.

5.2. Taux de subsidence

Une reconstitution par étape de la sédimentation dans le forage depuis 78 ka BP a été établie (Fig. 2). En mer Égée, le niveau marin est estimé entre -43 et -55 m vers 10 ka BP [11]. Sur l'ensemble du forage, le taux de subsidence moyen est de 1,8 mm an^{-1} . Il est proche du taux de sédimentation moyen (2,5 mm an^{-1}). Ces valeurs moyennes masquent une grande variabilité de détail.

De 205 à 112 m, les taux de subsidence de l'ensemble inférieur proviennent des données fournies par

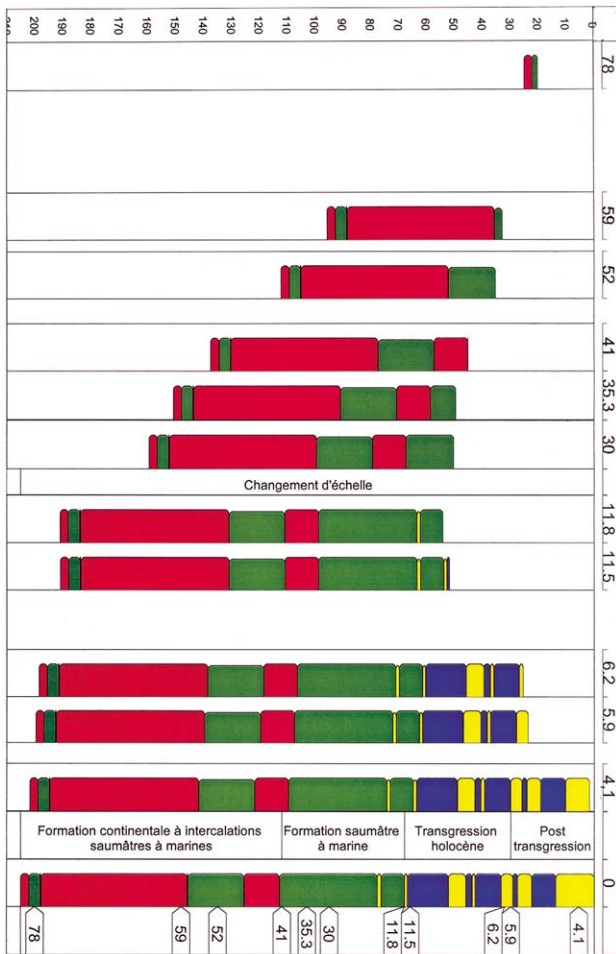


Figure 2. Évolution temporelle des dépôts traversés par le forage (deux échelles horizontales avec les âges en ka des différentes étapes : avant la transgression holocène et depuis 12 ka) ; à droite, coupe géologique avec la lithologie dominante simplifiée (bleu : argile ; jaune : sable et conglomérat marin à deltaïque ; vert : silt argileux ; rouge : sable et conglomérat continentaux), principaux ensembles sédimentaires et échantillons datés.

Figure 2. Temporal evolution of the deposits in the borehole (two horizontal scales, with ages in ka of the different steps: before Holocene transgression, and since 12 ka); on the right, geological cross section with the simplified lithology (blue: clay; yellow: marine to deltaic sand and conglomerate; green: clayey silts; red: continental sand and conglomerate), main sedimentary units and datings.

les niveaux marins intercalés. Dans ces hauts niveaux marins (5a et 3c), la tranche d'eau était mince (<5 m), compte tenu de la présence permanente de faciès limoneux associés et de la brièveté des incursions marines. Compte tenu de l'âge de ces niveaux lagunaires, la valeur du taux de subsidence (2,8 à 3,0 mm an⁻¹) serait proche de celle du taux de sédimentation, estimé à 2,5 mm an⁻¹. Un changement survient vers 41 ka (112 m), avec une modification lithologique majeure et l'installation d'une eau saumâtre. Le niveau marin mondial était, en effet, plus bas que lors des incursions marines précédentes (5a et 3c). L'origine de ce changement ne serait donc pas eustatique, mais due

à une augmentation du taux de subsidence d'origine tectonique.

De 112 à 68 m, la diminution de profondeur se poursuit, malgré quelques remontées donnant des niveaux plus riches en fossiles marins (coraux à 95 m). Les passées marines littorales soulignent des ingressions dans un golfe lagunaire oligo- à mésohalin. Le taux de subsidence reste voisin du taux de sédimentation.

De 68 à 30 m, le milieu change, la mer envahit le golfe. Au seuil de Rion, la profondeur actuelle est de 65 m. Sous ce fond, une vingtaine de mètres de sédiments meubles recouvrent une surface d'érosion qui matérialiserait l'émersion durant la dernière glaciation [14]. Lors de l'invasion du golfe de Corinthe par la transgression holocène vers 11,8 ka, le niveau marin mondial était de -60 m environ [14], ce qui correspond au seuil de Rion à cette époque. La subsidence ultérieure du seuil peut être corrélée à l'activité des failles bordières voisines. Elle serait de 1,5 mm an⁻¹ pour les derniers 10 ka, proche de la vitesse de 1,6 mm an⁻¹ définie sur la faille d'Heliki [9]. Entre 17 et 7 ka, la vitesse moyenne de remontée de la mer a été d'environ 10 mm an⁻¹ [5]. Or, le forage indique un taux de sédimentation de 6,4 mm an⁻¹. Ceci implique qu'à la fin de la transgression, vers 6 ka BP, la profondeur de l'eau au niveau du forage était d'environ 18 m.

De 30 à 3,8 m, le niveau de la mer monte encore de quelques mètres. Les sédiments comblent la tranche d'eau formée par la transgression, avec un taux de sédimentation de 13,8 mm an⁻¹. Les sédiments marins sont grossiers de 30 à 23 m, puis les faciès marins argilo-silteux à sableux se poursuivent jusqu'à 13 m. À partir de cette profondeur, les faciès deltaïques ou lagunaires envahissent le site : des faciès d'émersion grossiers conglomératiques gris-rose à concrétions carbonatées alternent avec des vases fines noires.

De 3,8 m jusqu'à la surface, les dépôts sont continentaux (alluvions, colluvions).

6. Premières conclusions sur l'activité et la géométrie de la faille d'Aigion

Les corrélations entre les dépôts marins et lacustres d'âge Pléistocène supérieur à Holocène des forages d'Aigion et les variations glacio-eustatiques du niveau de la mer apportent des indications sur l'activité de la faille d'Aigion pendant cette période et sur la géométrie et la dynamique des dépôts à son voisinage.

Le profil sismique montre une légère pente vers le sud des couches déposées dans le toit de la faille. Elle résulterait du basculement à contre-pente lié au jeu de la faille. Une pente de 2 à 3% est confirmée par les différences de profondeur de niveaux-repères da-

tés dans les forages de Giftissa et $\Gamma 1$ (Fig. 1), pour lesquels les taux de sédimentation étaient comparables. Ces basculements à contre-pente sont classiques dans le toit des failles normales du rift de Corinthe, et peuvent produire des accumulations en éventail, avec des pendages de 20 à 30° dans leur base des éventails.

Dans le mur en surrection de la faille d'Aigion, des argiles silteuses blanches saumâtres à intercalations marines ont été échantillonnées vers 40 m d'altitude. Les datations U/Th de fragments de coquilles n'ont pas donné d'âge fiable. Les datations ^{14}C indiquent un âge minimal de 34 ka, qui pourrait se corréler au haut niveau marin 3a. Pour ce niveau marin [3] et une profondeur d'eau inférieure à 5 m indiquée par les micro-organismes, le soulèvement du mur de la faille a été de 86 m, soit une vitesse moyenne de $2,5 \text{ mm an}^{-1}$. Dans le forage, le niveau marin correspondant se situe vers 103 m de profondeur, indiquant une subsidence moyenne de $1,7 \text{ mm an}^{-1}$ durant les

derniers 34 ka. Le décalage total de ce niveau repère est de 126 m environ. Le jeu vertical de la faille d'Aigion sur cette période serait donc de 4 mm an^{-1} . Si le pendage de la faille est de 55 à 60°, comme pour la faille voisine d'Heliki, le jeu réel de la faille serait d'environ 5 mm an^{-1} . C'est la première fois que, dans le golfe de Corinthe, le décalage d'un niveau sédimentaire bien repéré stratigraphiquement de part et d'autre d'une faille majeure active est identifié et permet de quantifier un taux de déformation verticale.

Les mesures de géodésie (GPS) indiquent une vitesse d'extension nord-sud du rift d'environ 15 mm an^{-1} au niveau d'Aigion (par exemple, [2]). Notre étude montre que 5 mm an^{-1} d'extension seraient transférés sur la faille d'Aigion. Il est donc probable que d'autres failles normales, probablement situées en mer, sont actives au niveau de cette transversale du rift [1].

Remerciements. Ce travail a été effectué dans le cadre du WP8 du programme européen Corseis (contrat n° EVG1-CT1999-00002). Les datations et le profil sismique ont été financés par l'IPSN dans le cadre du GDR Corinthe (CNRS/Insu/IPSN/IFP). Les auteurs remercient S. Leroy, D. Pantosti, O. Scotti et M. Cushing pour leur aide et leurs suggestions.

Références

- [1] X. Bernard et al., The $M_s = 6.2$, June 15, 1995 Aigion earthquake (Greece): evidence for low angle normal faulting in the Corinth rift, *J. Seismol.* 1 (2) (1997) 131–150.
- [2] P. Briole, J.C. Ruegg, H. Lyon-Caen, A. Rigo, K. Paradissi, G. Veis, D. Hatzfeld, A. Deschamps, Active deformation of the Gulf of Corinth, Greece: results of repeated GPS surveys between 1990 and 1993, *Ann. Geophys.* 12 (1994) C65.
- [3] J. Chappel, N.S. Shackleton, Oxygen isotopes and sea level, *Nature* 324 (1986) 137–140.
- [4] A.B. Cundy, S. Kortekaas, T. Dewez, I.S. Stewart, P.E.F. Collins, I.W. Croudace, H. Maroukian, D. Papanastassiou, P. Gaki-Papanastassiou, K. Pavlopoulos, A. Dawson, Coastal wetlands as recorders of earthquake subsidence in the Aegean: a case study of the 1894 Gulf of Atalanti earthquakes, Central Greece, *Mar. Geol.* 170 (2000) 3–26.
- [5] K. Fleming, P. Johnston, D. Zwartz, Y. Yokoyama, K. Lambeck, J. Chappell, Refining the eustatic sea level curve since the Last Glacial Maximum using far- and intermediate field sites, *Earth Planet. Sci. Lett.* 163 (1998) 327–342.
- [6] N. Flotte, D. Sorel, Structural cross-sections through the Corinth–Patras detachment fault-system in Northern Peloponnesus (Aegean Arc, Greece), in: 9th Int. Congress Geol. Soc. Greece, *Bull. Geol. Soc. Greece* XXXIV (1) (2001) 235–241.
- [7] B. Keraudren, D. Sorel, The terraces of Corinth (Greece): a detailed record of eustatic sea level variations during the last 500 000 years, *Mar. Geol.* 77 (1987) 99–107.
- [8] I.K. Koukouvelas, T. Doutsos, Implications of structural segmentation during earthquakes: the 1995 Egean earthquake, Gulf of Corinth, Greece, *J. Struct. Geol.* 18 (12) (1996) 1381–1388.
- [9] I.K. Koukouvelas, L. Stamatopoulos, D. Katsonopoulou, S. Pavlides, A palaeoseismological and geoarchaeological investigation of the Eliki fault, Gulf of Corinth, Greece, *J. Struct. Geol.* 23 (2001) 531–544.
- [10] L.-D. Labeyrie, J.-C. Duplessy, P.-L. Blanc, Variations in mode of formation and temperature of oceanic deep waters over the past 125 000 years, *Nature* 327 (1987) 477–482.
- [11] K. Lambeck, Sea level change and shore line evolution in Aegean Greece since Upper Palaeolithic time, *Antiquity* 70 (1996).
- [12] E. Lekkas, S. Lozios, E. Skourtsos, H. Kranis, Liquefaction, ground fissures and coastline change during the Egean earthquake (15 June 1995; Central-Western Greece), *Terra Nova* 8 (1996) 648–654.
- [13] V. Lykousis, D. Sakellariou, D. Papanikolaou, Sequence stratigraphy in the N. margin of the Gulf of Corinth: implications to Upper Quaternary Basin Evolution, *Bull. Geol. Soc. Greece* XII (2) (1998) 157–164.
- [14] C. Perissoratis, D.J.W. Piper, V. Lykousis, Alternating marine and lacustrine sedimentation during Late Quaternary in the Gulf of Corinth rift basin, central Greece, *Mar. Geol.* 167 (2000) 391–411.
- [15] A. Rietbrock, C. Tibéri, F. Scherbaum, H. Lyon-Caen, Seismic slip on a low angle normal fault in the Gulf of Corinth: evidence from high-resolution cluster analysis of microearthquakes, *Geophys. Res. Lett.* 23 (14) (1996) 1817–1820.
- [16] A. Rigo, H. Lyon-Caen, R. Armijo, A. Deschamps, D. Hatzfeld, K. Makropoulos, P. Papadimitriou, I. Kassaras, A microseismic study in the western part of the Gulf of Corinth (Greece): implications for a large-scale normal faulting mechanism, *Geophys. J. Int.* 126 (1996) 663–688.
- [17] D. Sorel, A Pleistocene and still-active detachment fault and the origin of the Corinth–Patras Rift, *Geology* 28 (1) (2000) 83–86.
- [18] S. Soter, Holocene uplift and subsidence of the Helike Delta, Gulf of Corinth, Greece, in: I.S. Stewart, C. Vita-Finzi (Eds.), *Coastal Tectonics*, *Geol. Soc. London Spec. Publ.* 146 (1998) 41–56.
- [19] M. Stuiver, P. Reimer, E. Bard, J.W. Beck, G.S. Burr, K.A. Hughen, B. Kromer, G. McCormac, J. van der Plicht, M. Spurk, Intcal98 radiocarbon age calibration, 24 000–0 cal BP, *Radiocarbon* 40 (3) (1998) 1041–1083.